

# Studi Kerentanan Airtanah Menggunakan Metode *Sintacs* Di Kecamatan Banguntapan, Kabupaten Bantul

Kartika Ayu Wandari

[Kartika.ayu.wandari@mail.ugm.ac.id](mailto:Kartika.ayu.wandari@mail.ugm.ac.id)

Ig. L. Setyawan Purnama

[setyapurna@geo.ugm.ac.id](mailto:setyapurna@geo.ugm.ac.id)

## Abstract

*Banguntapan District is one of the peri-urban areas affected by the development of Yogyakarta City. This is sought on the risk of groundwater contamination. The application of the SINTACS method was carried out to assess the vulnerability of groundwater. The results of the groundwater vulnerability assessment and mapping showed that the intrinsic and specific groundwater vulnerability levels consisted of three classes, very low, quite high, and very high with groundwater vulnerability index values ranging from 113,875 - 146,375 and 119,875 - 151,4. The results of matrix analysis and the correlation between the nitrate concentration and the level of intrinsic and specific groundwater vulnerability show low values. The low validation results are due to parameters that are not in accordance with the conditions of the research location, infiltration and nitrate concentration as well as limited access during the pandemic so that variations in land use during groundwater sampling are limited. Parameters that are the dominant factor based on the result of the sensitivity analysis of single parameter is depth of groundwater.*

**Key words:** Groundwater Vulnerability, SINTACS Method, Nitrate, Peri urban.

## Abstrak

*Kecamatan Banguntapan merupakan salah satu daerah pinggiran kota yang terdampak dari adanya perkembangan Kota Yogyakarta. Hal ini berpotensi pada meningkatnya risiko pencemaran airtanah. Penerapan metode SINTACS. Hasil penilaian dan pemetaan kerentanan airtanah menunjukkan bahwa tingkat kerentanan airtanah intrinsik dan spesifik terdiri atas tiga kelas yaitu sangat rendah, cukup tinggi, dan sangat tinggi dengan nilai indeks kerentanan airtanah berturut-turut berkisar antara 113,875 – 146,375 dan 119,875 – 151,4. Hasil analisis matriks dan korelasi antara konsentrasi nitrat dengan tingkat kerentanan airtanah intrinsik dan spesifik menunjukkan nilai yang rendah. Rendahnya hasil validasi tersebut dikarenakan terdapat parameter yang kurang sesuai dengan kondisi lokasi penelitian yaitu infiltrasi dan konsentrasi nitrat serta adanya keterbatasan akses saat pandemi sehingga variasi penggunaan lahan saat pengambilan sampel airtanah terbatas. Parameter yang menjadi faktor dominan yang memengaruhi tingkat kerentanan airtanah di Kecamatan Banguntapan berdasarkan hasil analisis sensitivitas parameter tunggal adalah kedalaman muka airtanah.*

**Kata kunci:** Kerentanan Airtanah, Metode SINTACS, Nitrat, Pinggiran Kota.

## 1. PENDAHULUAN

Kebutuhan air untuk memenuhi berbagai kebutuhan hidup bersifat terus-menerus dan selalu bertambah sejalan dengan pertumbuhan penduduk, namun ketersediaannya memiliki keterbatasan dalam jumlah dan mutu serta pada bentuk, ruang, dan waktu (Purnama et al., 2006). Jenis air tawar yang dapat dimanfaatkan oleh manusia ada tiga jenis yaitu air hujan, air permukaan, dan air tanah. Dari tiga jenis air tersebut yang banyak dimanfaatkan oleh manusia adalah air tanah. Hal ini disebabkan air tanah memiliki kuantitas yang lebih banyak, seperlima bagian dari 3 % air tawar yang ada di bumi, dan kualitas yang relatif lebih baik daripada jenis air lainnya (Shiklomanov, 1993; Effendi, 2003). Kondisi airtanah berbeda-beda pada setiap wilayah karena morfologi, geologi, dan genesis yang bervariasi sehingga berpengaruh pada sifat fisik, kimia, dan biologi suatu airtanah (Santosa, 2012). Hal tersebut akan mencirikan karakteristik fisik dari suatu wilayah termasuk karakteristik hidrogeologi airtanah yang berkembang. Karakteristik hidrogeologi tersusun atas beberapa parameter utama geologi dan hidrologi sebagai sistem yang memungkinkan pergerakan air di dalam lapisan batuan (Aller, 1987).

Pada umumnya daerah perkotaan memiliki jumlah

penduduk yang besar sehingga mendorong kebutuhan akan air bersih yang besar pula misalnya di Kota Yogyakarta. Perkembangan yang pesat di Kota Yogyakarta akan berdampak pula pada daerah pinggirannya termasuk Kecamatan Banguntapan, Kabupaten Bantul. Perkembangan tersebut akan meningkatkan jumlah dan aktivitas manusia yang dapat berpotensi menjadi sumber pencemar. Aspek pencemaran berkaitan erat dengan aktivitas manusia dalam mengelola dan memanfaatkan sumberdaya alam. Hasil dari adanya aktivitas manusia tersebut berupa penggunaan lahan. Tingginya pertumbuhan penduduk akan meningkatkan jumlah eksploitasi sumur, penggunaan air tanah serta penggunaan lahan yang tidak sesuai di sekitar sumber daya air (Knodel et al., 2007). Oleh karena itu, pemanfaatan airtanah perlu memperhatikan keseimbangan lingkungan agar dapat berkelanjutan.

Salah satu pendekatan yang banyak dilakukan untuk menjaga keberlanjutan airtanah adalah dengan mengkaji kerentanan airtanah terhadap pencemaran (Sinan dan Razack, 2008). Penelitian ini mengkaji kerentanan airtanah terhadap pencemaran di Kecamatan Banguntapan, Kabupaten Bantul dengan menggunakan metode *SINTACS*. Metode ini merupakan salah satu metode indeks *Point Count System Model (PCSM)* yang menggunakan sistem skor

(rating) dan pembobotan parameter fisik untuk menilai kerentanan airtanah terhadap pencemaran (Vrba dan Zaporozec, 1994). Metode ini dipilih karena lebih representatif untuk penilaian dan pemetaan kerentanan airtanah pada skala kecil hingga sedang serta sesuai dengan karakteristik daerah bermorfologi dataran (Civita, 2010). Kajian kerentanan airtanah terhadap pencemaran menjadi penting dilakukan untuk mengetahui tingkat kerentanan dan sebagai kerangka acuan dalam perencanaan, pembangunan, dan pengelolaan airtanah. Hasil kajian kerentanan airtanah yang berupa peta kerentanan airtanah dapat menunjukkan daerah yang menjadi prioritas dalam pemantauan dan perlindungan airtanah, penyelidikan lebih lanjut terkait airtanah, serta pengembangan penilaian risiko dan pendidikan di masa depan (Worral dan Kolpin, 2003).

## 2. METODE PENELITIAN

### Teknik Pengolahan Data

#### 3. Kedalaman Muka Airtanah (S)

Kedalaman muka airtanah dari setiap sampel sumur yang dihitung kemudian diinput ke *Ms. Excel* yang berisi informasi koordinat hasil *plotting* GPS di lapangan dan kedalaman muka airtanah. Data tersebut kemudian diinput ke *ArcGIS* untuk diolah sehingga dapat diketahui distribusi titik-titik sampel sumur dengan kedalaman airtanah tertentu sebagai hasil lapangan. Titik tersebut kemudian diolah dengan metode interpolasi untuk menghasilkan arah aliran airtanah.

#### 4. Infiltrasi (I)

Data untuk perhitungan infiltrasi menggunakan data curah hujan dari stasiun hujan terdekat selama 10 tahun 2009-2019. Adapun perhitungan infiltrasi menggunakan persamaan 1-2 (Hendrayana, 2011).

$$\text{Infiltrasi} = (P - R_o) - E_{tr} \quad (1)$$

$$E_{Tr} = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{(800 + 25T + 0,05T^3)^2}}} \quad (2)$$

Keterangan:

$E_{Tr}$  : Evapotranspirasi nyata (mm/tahun)  
 $P$  : Curah hujan rata-rata tahunan (mm/tahun)  
 $T$  : Suhu ( $^{\circ}\text{C}$ )

Nilai Runoff dapat diperoleh dengan menghitung melalui persamaan 3 (Sharma, 1990 dalam Hendrayana, 2011).

$$R_o = \frac{1,511 \times P^{1,44}}{T^{1,84} \times A^{0,0618}} \quad (3)$$

Keterangan:

$R_o$  : Runoff (mm/tahun)  
 $P$  : Presipitasi (mm/tahun)  
 $T$  : Suhu Rata-rata Tahunan ( $^{\circ}\text{C}$ )  
 $A$  : Luas Area ( $\text{km}^2$ )

#### 5. Kondisi Zona Tak Jenuh (N)

Kondisi zona tak jenuh dapat diketahui dengan melakukan interpretasi dari peta geologi dan data geolistrik. Interpretasi peta geologi akan menunjukkan karakteristik geologi wilayah kajian yang berhubungan dengan masuknya bahan pencemar ke dalam airtanah. Data geolistrik berguna untuk mengetahui informasi mengenai tipe akuifer, transmisivitas, dan tebal akuifer.

#### 6. Tekstur Tanah (T)

Kerentanan intrinsik air tanah sangat dikendalikan oleh karakteristik tekstur tanah (Al Amoush et al. 2010). Ketebalan dan kekasaran tanah juga mempengaruhi kegiatan terjadinya kontaminasi, semakin tebal dan kasar suatu lapisan tanah maka akan berdampak juga pada waktu kontaminasi menuju ke muka airtanah. Informasi mengenai jenis tekstur tanah diperoleh dari peta jenis tanah lokasi penelitian.

#### 7. Media Akuifer (A)

Akuifer mengandung bahan permeabel jenuh yang cukup untuk menghasilkan jumlah air bagi sumur atau mata air. Parameter media akuifer dapat diketahui melalui interpretasi peta geologi dan data geolistrik. Arah dan jalur aliran zat pencemar tergantung media akuifer. Semakin besar kemampuan akuifer dapat menahan laju zat pencemar maka potensi airtanah tercemar maka akan semakin kecil.

#### 8. Konduktivitas Hidraulik (C)

Nilai konduktivitas hidraulik diperoleh melalui interpretasi data geolistrik. Data geolistrik biasanya memuat informasi mengenai transmisivitas atau transmisibilitas akuifer. Adapun nilai konduktivitas hidraulik diperoleh dengan persamaan 4 (Santosa, 2012).

$$K = T/d \quad (4)$$

Keterangan:

$K$  : Konduktivitas Hidraulika (m/s)  
 $T$  : Transmisivitas ( $\text{m}^2/\text{s}$ )  
 $d$  : Ketebalan akuifer (m)

#### 9. Kemiringan Lereng (S)

Informasi kemiringan lereng dapat diketahui melalui data titik tinggi dari DEM ALOS PALSAR yang berupa data raster yang diolah menggunakan *3D- Analysis Tools* pada *software ArcGIS*. Hasil olah data tersebut berupa kelas lereng yang belum teratur sehingga perlu diklasifikasi ulang sesuai dengan kelas yang digunakan dalam metode *SINTACS*.

Dalam metode *SINTACS* setiap parameter memiliki peranan penting yang diwakilkan dengan nilai bobot. Tiap variabel ini telah ditetapkan nilai bobotnya yaitu bernilai 1 hingga 5. Jika suatu variabel menyebabkan dampak yang sangat besar, maka variabel tersebut mempunyai nilai bobot 5, dan sebaliknya. Adapun nilai bobot dari masing-masing variabel disajikan dalam Tabel 1. Pada kajian ini menggunakan skenario pembobotan *Severe Impact*, karena disesuaikan dengan karakteristik hidrogeologi airtanah dan pengaruh penggunaan lahan dengan sumber pencemar yang meluas.

Tabel 1. Nilai Bobot dari Parameter *SINTACS*

Parameter	Normal I	Severe I	Drainage	Karst	Fissured	Nitrates
S	5	5	4	2	3	5
I	4	5	4	5	3	5
N	5	4	4	1	3	4
T	3	5	2	3	4	5
A	3	3	5	5	4	2
C	3	2	5	5	5	2
S	3	2	2	5	4	3

(Sumber: Civita, 2010)

### Teknik Analisis Data

a. Indeks Kerentanan Airtanah Intrinsik *SINTACS/ SINTACS Intrinsic Vulnerability Index (SIVI)*

Parameter *SINTACS* memiliki peranan yang sama penting dalam menilai kerentanan airtanah. Setiap parameter diberi bobot antara 1 sampai 5, dimana semakin besar pengaruh suatu parameter terhadap kerentanan airtanah maka bobotnya akan semakin besar. Indeks ini sangat berguna dalam skala regional untuk mengetahui kerentanan airtanah suatu wilayah. Indeks kerentanan airtanah intrinsik *SINTACS* diperoleh melalui persamaan 5 (Civita, 2010).

$$SIVI = \sum_{i=1}^7 P_i \times W_i \quad (5)$$

Keterangan:

SIVI : Indeks Kerentanan Airtanah Intrinsik Metode *SINTACS*

P<sub>i</sub> : Rating dari setiap parameter *SINTACS*

W<sub>i</sub> : Bobot dari setiap parameter *SINTACS*

Indeks kerentanan airtanah intrinsik menunjukkan potensi pencemaran yang mungkin dapat terjadi pada airtanah. Nilai indeks ini sebelum diklasifikasikan menjadi enam kelas tingkat kerentanan airtanah intrinsik berdasarkan Tabel 2. perlu dinormalisasikan. Normalisasi bertujuan untuk menyetarakan nilai indeks dalam rentang 0-100. Adapun normalisasi nilai indeks dilakukan berdasarkan persamaan 6 (Civita dan De Maio, 2004).

$$SI_{norm} = \frac{(SI_{raw} - SI_{min})}{(SI_{max} - SI_{min})} \times 100 \quad (6)$$

Keterangan:

SI<sub>norm</sub> : Indeks kerentanan yang dinormalisasi

SI<sub>raw</sub> : Indeks kerentanan sesuai hasil perhitungan

SI<sub>min</sub> : Indeks kerentanan terendah

SI<sub>max</sub> : Indeks kerentanan tertinggi

Tabel 2. Klasifikasi Kerentanan Airtanah Intrinsik Metode *SINTACS*

Interval Indeks	Klasifikasi
0-24	Sangat rendah
>24-35	Rendah
>35-49	Sedang
>49-69	Cukup tinggi
>69-79	Tinggi
>79-100	Sangat tinggi

(Sumber: Civita dan De Maio, 2004)

b. Indeks Kerentanan Airtanah Spesifik Modifikasi Metode *SINTACS/ SINTACS Specific Vulnerability Index (SSVI)*

Kerentanan airtanah spesifik di suatu wilayah dapat diketahui dengan menambahkan parameter penggunaan lahan sebagai parameter yang dipengaruhi oleh proses antropogenik. Penambahan parameter tersebut didasarkan atas jenis pencemar yang mempengaruhi penilaian kerentanan airtanah terhadap pencemaran. Gabungan antara parameter penggunaan lahan dengan indeks kerentanan airtanah intrinsik *SINTACS* digunakan untuk menghitung indeks kerentanan airtanah spesifik modifikasi metode *SINTACS (SSVI)* seperti pada persamaan 7 (Bastida et al., 2009).

$$SSVI = SIVI + AI_r \times AI_w \quad (7)$$

Keterangan:

SSVI: Indeks Kerentanan Airtanah Spesifik Modifikasi Metode *SINTACS*

SIVI : Indeks Kerentanan Airtanah Intrinsik Metode *SINTACS*

AI : Parameter Penggunaan Lahan

r : Rating Parameter Penggunaan

Lahan

w : Bobot Parameter Penggunaan Lahan

Wilayah yang memiliki indeks kerentanan tinggi, ditandai dengan lebih rentannya airtanah terhadap pencemaran dibandingkan dengan indeks kerentanan yang rendah. Penentuan rating untuk parameter penggunaan lahan disajikan pada Tabel 3, sementara untuk bobot (bernilai 1-5) dipertimbangkan berdasarkan nilai *Nitrate Vulnerability Index (NVI)* dan korelasi Spearman's rho. Metode NVI diperoleh dengan menggunakan persamaan NVI dan diklasifikasikan menurut Tabel 5. Semakin kuat korelasi antara NVI dengan konsentrasi nitrat, maka semakin tinggi nilai bobot yang diberikan. Nilai indeks kerentanan nitrat diperoleh melalui persamaan 8 (Bastida et al., 2009).

$$NVI = SIVI \times LU \quad (8)$$

Keterangan:

NVI : Indeks Kerentanan Nitrat

SIVI : Indeks Kerentanan Airtanah Intrinsik Metode *SINTACS*

LU : Rating risiko potensial yang berkaitan dengan *landuse* (Tabel 4)

Tabel 3. Rating Variabel Penggunaan Lahan

Jenis Penggunaan Lahan	Deskripsi	Rating
Permukiman	Lahan terbangun seperti aspal, beton, kompleks perdagangan dan industri, DAM, tanggul, hunian tunggal atau berkelompok, jalan utama dan jalan lokal	8
Pertanian	Areal pertanian irigasi maupun non-irigasi	8
Tutupan vegetasi alami	Lahan penggembalaan/ padang rumput dan bentuk tutupan vegetasi lain (kurang dari 20%)	2
Tubuh air	Semua bentuk tubuh air, termasuk sungai dan danau	3
Kolam penguapan	Kolam penguapan yang digunakan untuk keperluan industri	2
Lahan kosong	Lahan terkonsolidasi seperti lahan berbatu, kerikil, kerakal, serta lahan tidak terkonsolidasi seperti lahan tanah terbuka	1
Areal peternakan	Areal peternakan baik ternak besar, sedang, maupun unggas dan permukiman yang memiliki sejumlah kandang ternak	8

(Sumber: Al Hanbali dan Kondoh, 2008)

Tabel 4. Rating Risiko Potensial yang Berkaitan dengan *Landuse*

Penggunaan Lahan	Rating
<b>Lokasi spesifik penggunaan lahan</b>	
1. Tempat pembuangan limbah beracun	9
2. Pembuangan minyak	7
3. Industri	6
4. Tempat pembuangan sampah padat (regional)	6
5. Tempat pembuangan sampah domestic (lokal)	5
6. Tempat pembuangan limbah lahan irigasi	4
7. Tempat pembuangan limbah cair	3
<b>Penggunaan lahan ekstensif</b>	
1. Daerah urban	8
2. Sawah beririgasi	8
3. Greenhouse/tanaman tomat	8
4. Kebun	6
5. Peternakan atau lahan lain yang tidak sesuai untuk pertanian	5
6. Lahan yang tidak diolah	5
7. Lahan yang tidak diolah sementara	5
8. Sawah tidak beririgasi	4
9. Hutan	1
10. Cagar alam	1
11. Gumuk pasir atau lahan terbuka	1

(Sumber: Secunda et al.,1998 dalam Bastida et al.,2009)

Tabel 5. Klasifikasi Interval Nilai *Nitrate Vulnerability Index (NVI)*

Interval	Klasifikasi
<70	Sangat rendah
70-100	Rendah
110-150	Sedang
150-190	Tinggi
>190	Sangat tinggi

(Sumber: Secunda et al.,1998 dalam Bastida et al.,2009)

#### c. Analisis Kualitas Airtanah

Analisis kualitas airtanah dilakukan melalui uji konsentrasi nitrat yang digunakan sebagai validasi data hasil penilaian dan pemetaan kerentanan airtanah dengan kondisi sesungguhnya di lokasi penelitian. Standar baku mutu konsentrasi nitrat yang dipilih dalam penelitian ini sesuai dengan PP No.82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air. Batasan kadar nitrat dalam baku mutu air minum kelas I adalah 10 mg/liter (Peraturan Pemerintah Republik Indonesia, 2001). Kelas kualitas airtanah berdasarkan parameter nitrat dibagi menjadi tiga kelas yaitu rendah (0-5 mg/liter), sedang (5-10 mg/liter), dan tinggi (>10 mg/liter). Hasil distribusi konsentrasi nitrat di lokasi penelitian juga dimasukkan dalam peta kerentanan airtanah (hasil validasi).

Validasi kerentanan airtanah dalam penelitian ini menggunakan metode analisis korelasi dan matriks. Analisis matriks dilakukan untuk mengetahui hubungan antara klasifikasi kerentanan airtanah intrinsik maupun spesifik dengan klasifikasi konsentrasi nitrat yang disajikan dalam bentuk tabel. Nilai persentase dari hasil analisis korelasi menggunakan metode Spearman's rho menunjukkan besarnya hubungan konsentrasi nitrat dengan parameter-parameter kerentanan airtanah intrinsik maupun spesifik.

#### d. Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengetahui pengaruh setiap parameter terhadap hasil dari penilaian dan pemetaan kerentanan airtanah sehingga dapat diketahui parameter yang menjadi faktor dominan yang memengaruhi kerentanan airtanah. Adapun analisis sensitivitas yang digunakan pada penelitian ini yaitu analisis parameter tunggal.

Analisis parameter tunggal adalah metode yang digunakan untuk mengevaluasi pengaruh setiap parameter *SINTACS* pada indeks kerentanan airtanah. Analisis ini membandingkan bobot efektif setiap parameter dengan bobot empiris yang telah ditentukan dalam metode *SINTACS*. Nilai bobot efektif yang dihasilkan akan mencerminkan tingkat pengaruh setiap parameter terhadap hasil penilaian dan pemetaan kerentanan airtanah di lokasi penelitian. Perhitungan bobot efektif dapat dihitung dengan persamaan 9 sebagai berikut (Majandang dan Sarapirome, 2013).

$$W = \frac{(P_r - P_w) \times 100}{SSVI}$$

(9)

Keterangan:

W : Bobot Efektif Setiap Parameter

$P_r$  : Hasil Rating Setiap Parameter

$P_w$  : Hasil Bobot Setiap Parameter

SSVI : Indeks Kerentanan Airtanah Spesifik

## 10. HASIL DAN PEMBAHASAN

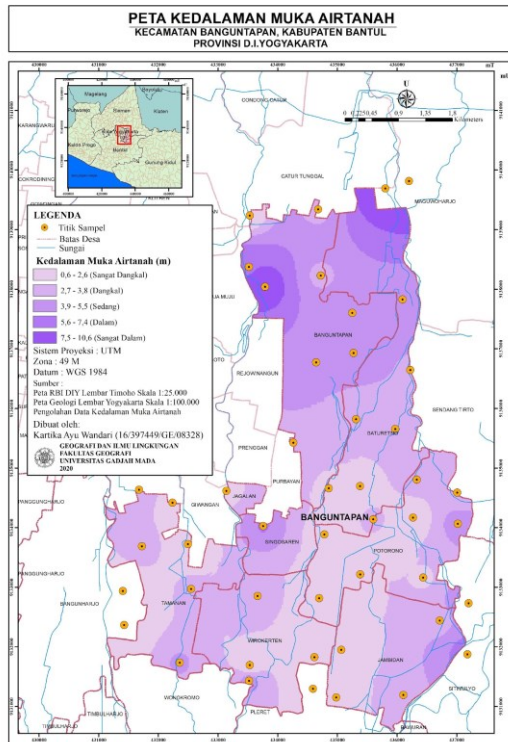
### 1. Kerentanan Airtanah Intrinsik dengan Menggunakan Metode *SINTACS*

#### a. Kedalaman Muka Airtanah (S)

Parameter kedalaman muka airtanah merupakan faktor penting dalam penilaian dan pemetaan kerentanan airtanah terhadap pencemaran dengan metode *SINTACS*. Parameter tersebut dapat mempengaruhi waktu lamanya proses transportasi bahan pencemar yang terbawa oleh air menuju akuifer airtanah. Semakin rendah kerentanan airtanahnya, semakin dalam kedalaman muka airtanahnya. Kedalaman muka airtanah di Kecamatan Banguntapan diperoleh dari 49 titik pengukuran sumur gali. Kecamatan Banguntapan memiliki kedalaman muka airtanah yang bervariasi antara 0,6 – 10,6 meter. Kedalaman muka airtanah di lokasi penelitian dapat diklasifikasikan menjadi lima kelas yaitu sangat dangkal (0,6 – 2,6 meter), dangkal (2,7 - 3,8 meter), sedang (3,9 – 5,5 meter), dalam (5,6 – 7,4 meter), dan sangat dalam (7,5 – 10,6 meter). Nilai kedalaman muka airtanah diklasifikasikan berdasarkan nilai interval dan rating kedalaman muka airtanah yang ada di lokasi penelitian. Kedalaman muka airtanah di lokasi penelitian semakin ke selatan cenderung semakin dangkal (Gambar 1). Airtanah dengan kedalaman sangat dangkal hingga dangkal sebagian besar berada pada bentuklahan dataran kaki Gunungapi Merapi Muda. Airtanah dengan kedalaman sedang banyak ditemukan pada bentuklahan dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda dan dataran alluvial Formasi Semilir. Airtanah dengan kedalaman dalam hingga sangat dalam ditemukan

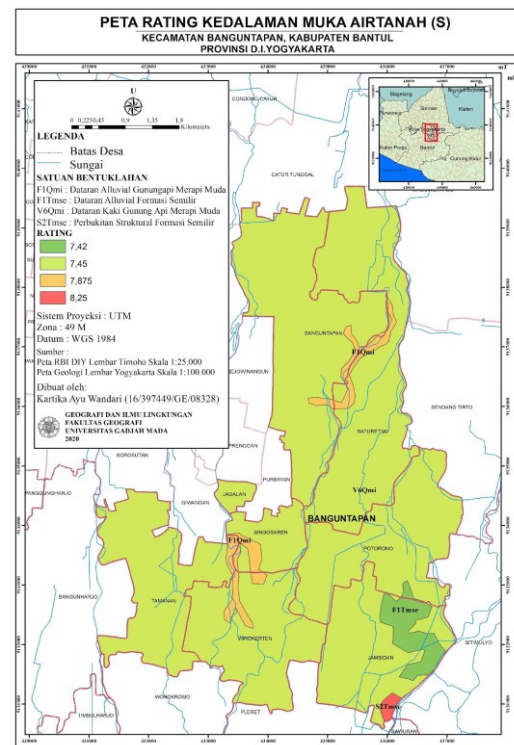


pada bentuklahan perbukitan struktural Formasi Semilir dan dataran kaki Gunungapi Merapi Muda bagian utara. Kecenderungan dalamnya kedalaman muka airtanah di bagian utara lokasi penelitian selain dipengaruhi oleh geomorfologi dan geologinya, juga dipengaruhi oleh semakin meningkatnya aktivitas manusia seperti mulai maraknya pembangunan hotel, mall, dan lainnya sehingga memengaruhi ketersediaan dan keberadaan airtanah.



Gambar 1. Peta Kedalaman Muka Airtanah dan Sebaran Titik Sampel Sumur Gali di Kecamatan Banguntapan

Gambar 2 menunjukkan peta rating kedalaman muka airtanah di Kecamatan Banguntapan berdasarkan satuan bentuklahannya. Nilai rating kedalaman muka airtanah di lokasi penelitian merupakan rerata nilai rating kedalaman muka airtanah yang ada di setiap satuan bentuklahan. Hasil rating nilai kedalaman muka airtanah di setiap bentuklahan bervariasi. Bentuklahan yang memiliki nilai rating kedalaman muka airtanah terendah adalah bentuklahan dataran alluvial Formasi Semilir dengan nilai rating sebesar 7,42. Bentuklahan dataran kaki Gunungapi Merapi Muda memiliki nilai rating sebesar 7,45. Bentuklahan dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda memiliki nilai rating sebesar 7,875. Adapun nilai rating kedalaman muka airtanah tertinggi yaitu sebesar 8,25 terdapat pada bentuklahan perbukitan struktural Formasi Semilir. Nilai rating yang semakin tinggi pada metode SINTACS menunjukkan tingkat kerentanan yang semakin tinggi pula. Distribusi nilai kedalaman muka airtanah hasil rating di lokasi penelitian berdasarkan klasifikasi metode *SINTACS* menunjukkan potensi pencemaran airtanah relatif tinggi. Hal tersebut karena didasarkan pada nilai kedalaman muka airtanah yang memiliki nilai rating tergolong tinggi.



Gambar 2. Peta Rating Kedalaman Muka Airtanah (S)

## b. Infiltrasi (I)

Infiltrasi merupakan bagian yang penting dalam siklus hidrologi maupun dalam proses pengalihan air hujan menjadi aliran di sungai (Sri Harto, 1993). Parameter infiltrasi berpengaruh dalam proses pergerakan zat pencemar dari permukaan tanah menuju zona tak jenuh hingga zona jenuh airtanah. Semakin besar jumlah air yang mengalami infiltrasi, maka kerentanan airtanah terhadap pencemaran akan semakin tinggi karena kemungkinan zat pencemar yang terbawa lebih banyak dan cepat terbawa oleh air menuju sistem airtanah. Presipitasi di lokasi penelitian berasal dari air hujan yang dianggap sebagai salah satu masukan airtanah (imbunan airtanah). Air hujan yang jatuh ke permukaan tanah tidak seluruhnya masuk dan terinfiltrasi ke dalam tanah, sebagian air hujan yang turun akan mengalami proses *surface runoff* dan evapotranspirasi. Nilai infiltrasi di lokasi penelitian ditentukan berdasarkan satuan bentuklahannya.

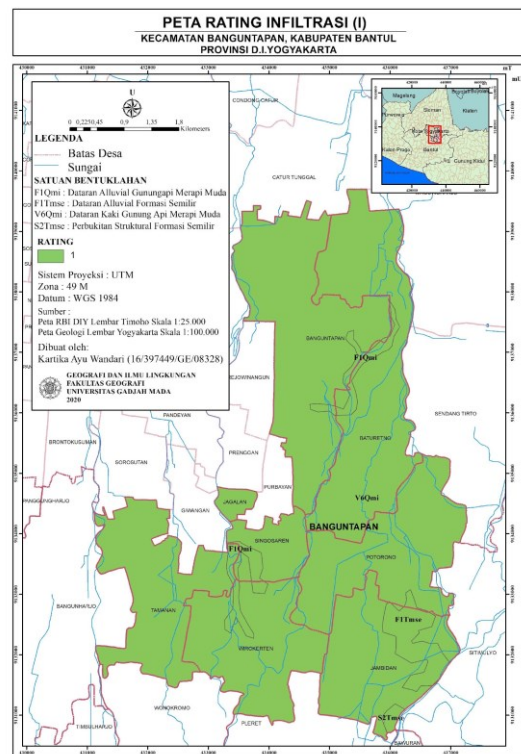
Besarnya curah hujan di lokasi penelitian menggunakan pendekatan hujan wilayah dengan metode isohyet yang menggunakan teknik interpolasi *Inverse Distance Weighted* (IDW). Metode tersebut digunakan karena memiliki nilai penyimpangan yang paling kecil. Hujan wilayah di Kecamatan Banguntapan selama 10 tahun terakhir yaitu sebesar 36,98 mm/tahun. Nilai tersebut menunjukkan bahwa hujan wilayah di Kecamatan Banguntapan tergolong sangat rendah. Setiap satuan bentuklahan memiliki besaran presipitasi /curah hujan yang bervariasi, yaitu antara 31,90 mm/tahun – 42,79 mm/tahun, besaran evapotranspirasi antara 21,42 mm/tahun – 21,82 mm/tahun, dan besaran runoff antara 0,30 mm/tahun – 0,45 mm/tahun.

Rating infiltrasi pada setiap satuan bentuklahan adalah sama yaitu 1. Nilai tersebut diperoleh berdasarkan penilaian kerentanan airtanah terhadap pencemaran klasifikasi metode *SINTACS*. Besaran infiltrasi interval 0 – 25 mm/tahun diberi nilai rating 1. Artinya laju infiltrasi di setiap bentuklahan

yang terdapat di lokasi penelitian cenderung lambat sehingga masuknya zat pencemar yang terbawa oleh aliran air hujan ke dalam sistem airtanah cenderung kecil/sedikit. Hal ini berkaitan dengan kondisi tanah di lokasi penelitian secara umum yang didominasi oleh tanah aluvial berupa material lempung berpasir. Faktor curah hujan yang rendah juga menyebabkan imbuhan air yang masuk ke dalam airtanah menjadi rendah, sehingga infiltrasi cenderung rendah.

Dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda, dataran alluvial Formasi Semilir, dataran kaki Gunungapi Merapi Muda, dan Perbukitan Struktural Formasi Semilir walaupun memiliki nilai rating infiltrasi yang sama, namun besaran infiltrasi di setiap bentuklahan tersebut bervariasi. Laju infiltrasi yang paling lama yaitu sebesar 12,74 mm/tahun terjadi pada bentuklahan dataran alluvial Formasi Semilir. Laju infiltrasi tercepat terjadi pada satuan bentuklahan dataran kaki Gunungapi Merapi Muda yaitu sebesar 21,83 mm/tahun. Perbedaan laju infiltrasi ini dipengaruhi oleh curah hujan, sifat fisik dan hidraulik kolom tanah, kondisi permukaan tanah dan pemanfaatan lahannya (Sudarmanto dkk, 2014). Distribusi spasial untuk rating infiltrasi ditunjukkan oleh Gambar 3.

Bentuklahan Formasi Semilir memiliki nilai infiltrasi yang relatif rendah dibandingkan dengan Formasi Gunungapi Merapi Muda. Kondisi tersebut dipengaruhi oleh material penyusunnya yang berupa vulkanik tua yang telah mengalami pelapukan lanjut dan lapisan tanah yang relatif tipis. Pada dataran alluvial Formasi Semilir, air hujan yang turun lebih banyak meresap pada tanah dengan material alluvium pada material yang tersortasi dengan baik sedangkan material yang ada pada Formasi Semilir berupa tuff-breksi, breksi pumice, tuff dasit, tuff andesit, tuffaceous claystone sehingga peresapan air hujan agak lambat dan kemungkinan masuknya zat pencemar ke dalam sistem akuifer tanah menjadi berkurang. Selain itu, pada bentuklahan perbukitan struktural Formasi Semilir memiliki lereng yang cenderung curam hingga sangat curam sehingga membuat laju aliran permukaan lebih besar dan air yang terinfiltrasi menjadi lebih sedikit dibandingkan daerah yang lebih datar topografinya. Kondisi topografi dan material yang demikian juga menyebabkan erosi dan longsor lahan yang terjadi terutama ketika musim penghujan.



Gambar 3. Peta Rating Infiltrasi (I)

### c. Kondisi Zona Tak Jenuh (N)

Penilaian parameter kondisi zona tak jenuh terhadap kerentanan airtanah terhadap pencemaran diperkirakan dari data geolistrik yang terdapat di lokasi penelitian. Data geolistrik tersebut tersebar pada empat titik desa di Kecamatan Banguntapan yaitu di Desa Potorono, Jambidan, Wirokerten, dan Baturetno. Pemberian rating pada parameter zona tak jenuh dilakukan berdasarkan batas bentuklahan. Zona tak jenuh merupakan lapisan yang berada di bawah lapisan tanah dan di atas muka airtanah. Kondisi zona tak jenuh ditunjukkan oleh hasil resistivitas data geolistrik yang telah diolah. Resistivitas tersebut diinterpretasi untuk mengetahui material lapisan tanah atau batuan yang ada di lapisan bawah tanah. Kecamatan Banguntapan terdiri atas delapan desa yaitu Desa Tamanan, Jagalan, Singosaren, Wirokerten, Jambidan, Potorono, Baturetno, dan Banguntapan. Pengukuran kedalaman muka airtanah tersebar di beberapa titik sampel sumur gali yang terdapat di delapan desa tersebut. Rata-rata kedalaman muka airtanah setiap desa berbeda-beda. Rata-rata kedalaman muka airtanah di setiap bentuklahan dihitung berdasarkan titik sampel sumur gali di lokasi penelitian untuk memperkirakan letak zona tak jenuh pada interpretasi data geolistrik. Penentuan rating untuk zona tak jenuh ini menggunakan rata-rata tertimbang dari data geolistrik.

Kondisi zona tak jenuh di setiap bentuklahan direpresentasikan oleh empat titik lokasi geolistrik. Bentuklahan dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda diwakili oleh titik geolistrik yang berada di Desa Wirokerten. Bentuklahan dataran alluvial Formasi Semilir diwakili oleh titik geolistrik yang berada di Desa Jambidan. Bentuklahan dataran kaki Gunungapi Merapi Muda diwakili oleh titik geolistrik yang berada di Desa Baturetno. Bentuklahan

perbukitan struktural Formasi Semilir material tuff diwakili oleh titik geolistrik yang berada di Desa Potorono.

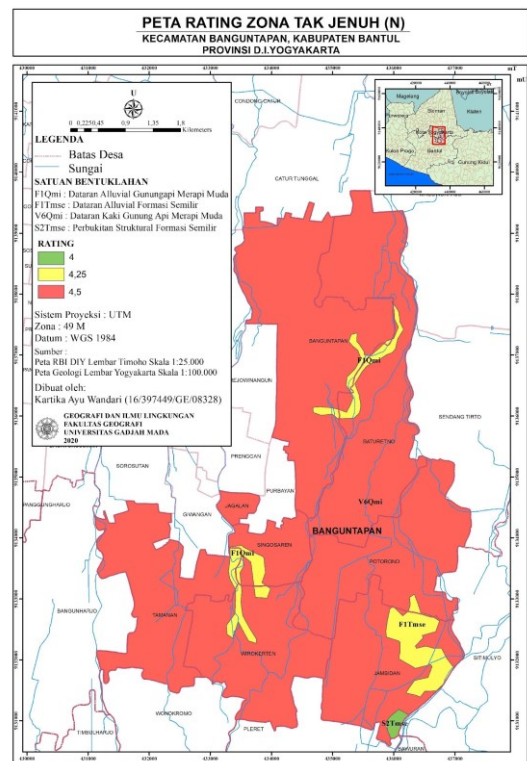
Hasil interpretasi resistivitas geolistrik pada dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda menunjukkan bahwa material litologi penyusun zona tak jenuh di titik tersebut terdiri atas pasir berlempung, pasir berlempung sisipan tuff, pasir, dan pasir sisipan tuff. Rata-rata kedalaman muka airtanah di titik tersebut adalah 2,6 meter. Lokasi zona tak jenuh di mulai dari kedalaman tersebut, yaitu kedalaman 2,6 meter hingga 11,7 meter. Hasil penilaian rating rerata tertimbang zona tak jenuh di bentuklahan ini sebesar 4,25.

Hasil interpretasi resistivitas geolistrik pada bentuklahan dataran alluvial Formasi Semilir menunjukkan bahwa material litologi penyusun zona tak jenuh di titik tersebut terdiri atas pasir, pasir berkerikil, pasir berlempung sisipan tuff, dan pasir berlempung. Rata-rata kedalaman muka airtanah di titik tersebut adalah 2,7 meter. Lokasi zona tak jenuh di mulai dari kedalaman tersebut, yaitu kedalaman 2,7 meter hingga 99,3 meter. Hasil penilaian rating rerata tertimbang zona tak jenuh di bentuklahan ini sebesar 4,25.

Hasil interpretasi resistivitas geolistrik pada bentuklahan dataran kaki Gunungapi Merapi Muda menunjukkan bahwa material litologi penyusun zona tak jenuh di titik tersebut terdiri atas pasir, kerikil, pasir berlempung sisipan tuff, dan pasir berlempung. Rata-rata kedalaman muka airtanah di titik tersebut adalah 3,07 meter. Lokasi zona tak jenuh di mulai dari kedalaman tersebut, yaitu kedalaman 3,07 meter hingga 72,7 meter. Hasil penilaian rating rerata tertimbang zona tak jenuh di bentuklahan ini sebesar 4,5.

Hasil interpretasi resistivitas geolistrik pada bentuklahan perbukitan struktural Formasi Semilir menunjukkan bahwa material litologi penyusun zona tak jenuh di titik tersebut terdiri atas pasir, pasir berlempung, pasir berkerikil, dan pasir berlempung. Rata-rata kedalaman muka airtanah di titik tersebut adalah 2,5 meter. Lokasi zona tak jenuh di mulai dari kedalaman tersebut, yaitu kedalaman 2,5 meter hingga 34,5 meter. Hasil penilaian rating rerata tertimbang zona tak jenuh di bentuklahan ini sebesar 4.

Hasil penilaian rating zona tak jenuh pada lokasi penelitian memiliki rentang antara 4 – 4,5. Nilai ini menunjukkan bahwa lokasi penelitian memiliki kondisi zona tak jenuh yang tergolong sedang. Rating yang tidak terlalu jauh berbeda antar bentuklahan disebabkan karena setiap bentuklahan memiliki rata-rata kedalaman muka airtanah yang hampir sama yaitu berkisar 2,5 - 3 meter dan memiliki material penyusun litologi yang hampir sama yaitu didominasi oleh material pasir. Peta persebaran untuk rating parameter zona tak jenuh ditunjukkan pada Gambar 4.



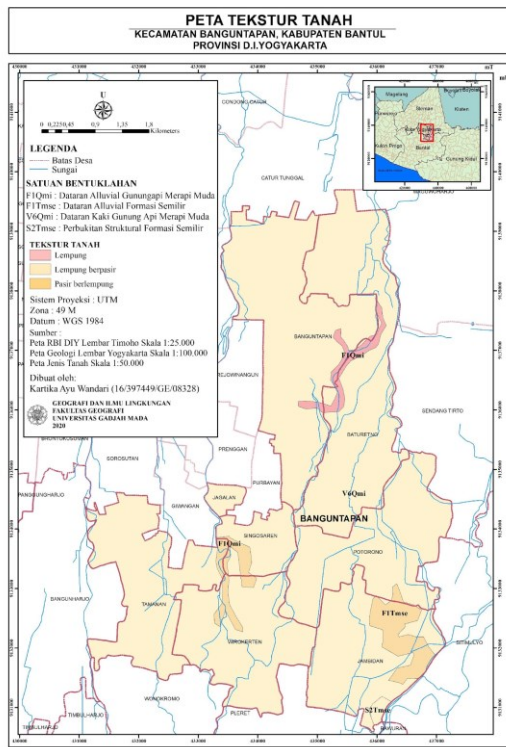
Gambar 4. Peta Rating Zona Tak Jenuh (N)

#### d. Tekstur Tanah (T)

Parameter tekstur tanah merupakan faktor yang juga berperan penting dalam penilaian kerentanan airtanah terhadap pencemaran. Tekstur tanah akan memengaruhi besarnya imbuhan yang terinfiltrasi ke dalam sistem akuifer airtanah. Kondisi tektur tanah yang semakin halus ukuran tektur tanah, maka permeabilitas juga semakin rendah sehingga dapat memperkecil kemungkinan masuknya bahan pencemar. Adapun sebaliknya, jika semakin kasar tekstur tanah, maka semakin cepat tanah akan meloloskan air sehingga kemungkinan masuknya bahan pencemar ke dalam sistem akuifer airtanah juga semakin besar.

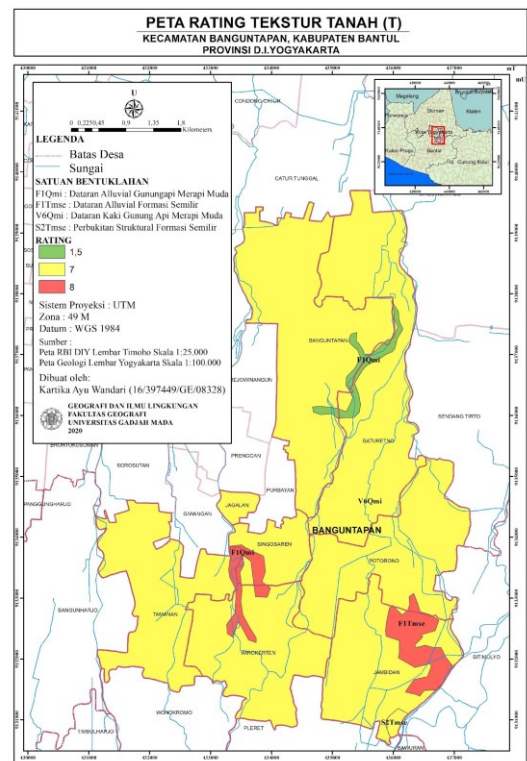
Tekstur tanah lokasi penelitian diperoleh dari Peta Tanah skala 1:50.000. Berdasarkan peta tersebut, tekstur tanah yang banyak ditemukan pada lokasi penelitian adalah lempung, lempung berpasir, dan pasir berlempung. Peta Tekstur Tanah di Kecamatan Banguntapan (Gambar 5.) menunjukkan bahwa sebagian besar lokasi penelitian memiliki tekstur berupa lempung berpasir yang terdapat pada bentuklahan dataran kaki Gunungapi Merapi Muda dan perbukitan struktural Formasi Semilir. Adapun jenis tekstur lempung ditemukan pada sebagian bentuklahan dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda yang berada di bagian utara lokasi penelitian dan tekstur pasir berlempung ditemukan pada bentuklahan dataran alluvial Formasi Semilir dan sebagian dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda yang berada di bagian selatan lokasi penelitian.





Gambar 5. Peta Tekstur Tanah di Kecamatan Banguntapan

Rating untuk parameter tekstur tanah di lokasi penelitian berkisar antara 1,5 – 8 (Gambar 6.). Tanah bertekstur pasir berlempung memiliki rating yang paling tinggi yaitu 8. Dominasi material pasir yang memiliki karakteristik berupa butir kasar dan adanya ruang pori besar diantara butir-butirnya sehingga masuknya air beserta bahan pencemar ke dalam sistem akuifer airtanah akan lebih mudah dan rentan. Tanah bertekstur lempung memiliki rating yang paling rendah yaitu 1,5. Karakteristik lempung yang berupa butiran halus, tingkat permeabilitas rendah dan memiliki sifat kembang susut yang sangat tinggi sehingga air sulit menyerap ke dalam sistem akuifer airtanah dan kemungkinan masuknya bahan pencemar semakin kecil.



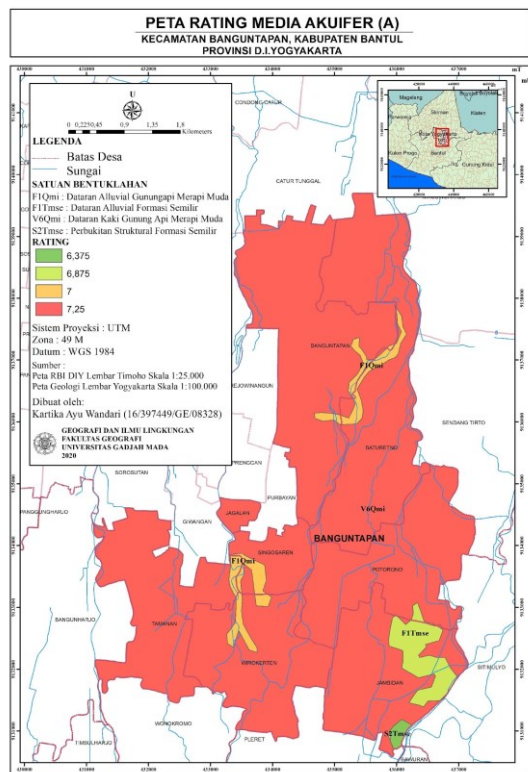
Gambar 6. Peta Rating Tekstur Tanah (T)

#### e. Media Akuifer (A)

Kondisi akuifer merupakan gambaran permukaan bawah tanah di suatu wilayah yang dipengaruhi oleh kondisi geologi dan geomorfologi yang berkembang di wilayah tersebut. Berbagai proses yang terjadi di bawah muka airtanah seperti pelarutan, dispersi, dan infiltrasi berinteraksi dengan akuifer. Data yang digunakan untuk menentukan media akuifer di lokasi penelitian adalah data geolistrik yang sama digunakan untuk menentukan zona tak jenuh. Litologi penyusun akuifer yang diinterpretasi yaitu berada di bawah batas kedalaman muka airtanah.

Penentuan rating untuk media akuifer ini juga menggunakan rata-rata tertimbang dari data geolistrik. Media akuifer di lokasi penelitian juga dibatasi oleh satuan bentuklahan. Media akuifer pada bentuklahan dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda tersusun atas material pasir berlempung, pasir berlempung sisipan tuff, pasir, dan pasir sisipan tuff. Bentuklahan dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda memiliki rating sebesar 7. Media akuifer pada bentuklahan dataran alluvial Formasi Semilir tersusun atas material pasir, pasir berkerikil, pasir berlempung sisipan tuff, dan pasir berlempung. Bentuklahan dataran alluvial Formasi Semilir memiliki rating sebesar 6,875. Media akuifer pada bentuklahan dataran kaki Gunungapi Merapi Muda tersusun atas material pasir, kerikil, pasir berlempung sisipan tuff, dan pasir berlempung. Bentuklahan dataran kaki Gunungapi Merapi Muda memiliki rating sebesar 7,25. Media akuifer pada bentuklahan perbukitan struktural Formasi Semilir tersusun atas material pasir, pasir berlempung, pasir berkerikil, dan pasir berlempung. Bentuklahan perbukitan struktural Formasi Semilir memiliki rating sebesar 6,375. Peta persebaran untuk rating parameter media akuifer ditunjukkan pada Gambar 7.





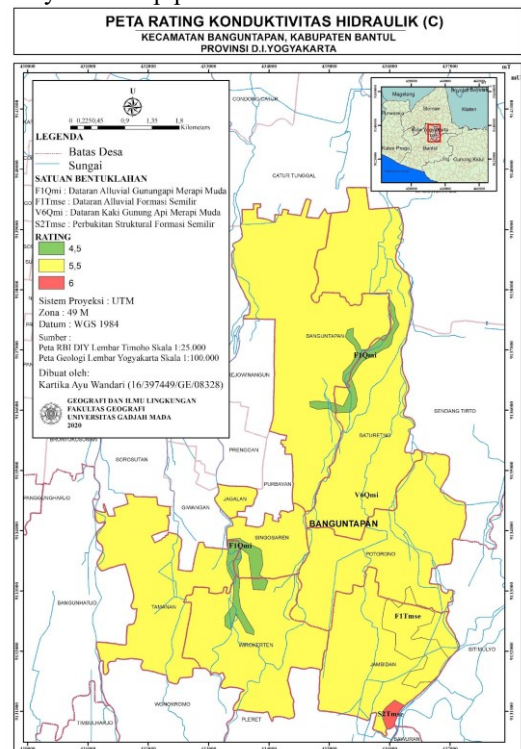
Gambar 7. Peta Rating Media Akuifer (A)

#### f. Konduktivitas Hidraulik (C)

Konduktivitas hidraulik berkaitan dengan kemampuan akuifer dalam meloloskan air. Apabila nilai konduktivitas hidraulik suatu batuan tinggi biasanya kerentanan airtanah terhadap pencemaran juga tinggi. Nilai konduktivitas hidraulik di lokasi penelitian diperoleh dari data geolistrik yang memiliki nilai transmisivitas (T) dan ketebalan akuifer (b). Nilai konduktivitas hidraulik tertinggi di lokasi penelitian berada pada bentuklahan perbukitan struktural Formasi Semilir yaitu 1,97 meter/hari, sedangkan nilai terendah berada pada bentuklahan dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda yaitu 0,47 meter/hari. Nilai konduktivitas hidraulik yang tinggi pada bentuklahan perbukitan struktural Formasi Semilir disebabkan karena nilai transmisivitasnya cukup tinggi yaitu 67,82 m<sup>2</sup>/hari, sedangkan ketebalan akuifer yang didapatkan dari data geolistrik sebesar 34,5 meter. Semakin besar nilai transmisivitas dan semakin tipis nilai ketebalan akuifernya maka semakin besar nilai konduktivitas hidraulik di lokasi tersebut sehingga kerentanan airtanah terhadap pencemarannya akan semakin tinggi. Faktor yang mempengaruhi nilai transmisivitas antara lain jenis batuan dari litologi penyusun akuifer di lokasi tersebut sehingga berpengaruh terhadap kemampuannya dalam mengalirkan air.

Nilai konduktivitas hidraulik di lokasi penelitian secara umum tergolong sedang. Bentuklahan dataran kaki Gunungapi Merapi Muda mempunyai morfologi dataran dengan lereng datar hingga landai memiliki nilai konduktivitas hidraulik yang rendah yaitu sebesar 1,17 meter/hari. Bentuklahan perbukitan struktural Formasi Semilir memiliki nilai konduktivitas hidraulik yang tinggi yaitu sebesar 1,97 meter/hari sehingga menghasilkan rating yang tinggi yaitu 6 (Gambar 8.). Nilai konduktivitas hidraulik yang tinggi pada suatu batuan menyebabkan

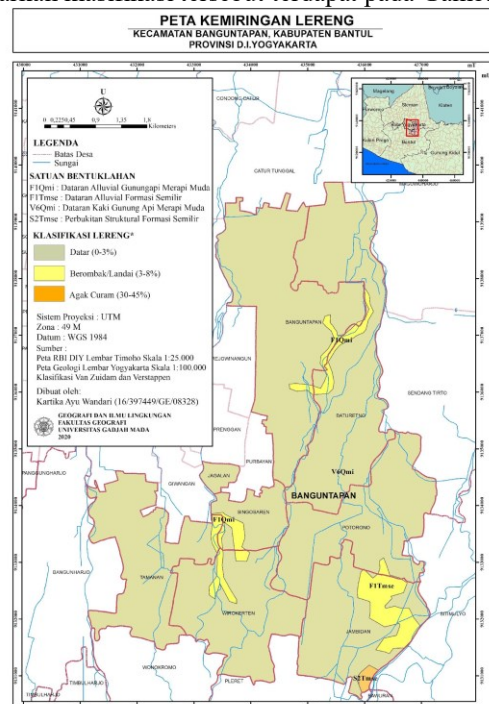
pergerakan masuknya air pembawa bahan pencemar akan lebih cepat sehingga berpengaruh besar terhadap kerentanan airtanahnya terhadap pencemaran.



Gambar 8 .Peta Rating Konduktivitas Hidraulik (C)

#### g. Lereng (S)

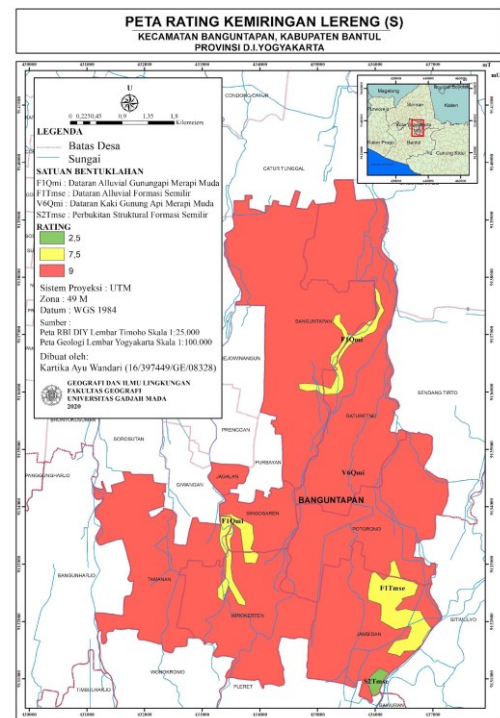
Kemiringan lereng menjadi salah satu parameter utama dalam proses delinasi satuan bentuklahan (Santosa dan Adji, 2014). Lereng di Kecamatan Banguntapan terdiri dari tiga kelas kemiringan lereng berdasarkan klasifikasi dari Zuidam (1979) dan Verstappen (1983). Ketiga kelas tersebut yaitu datar (0-3%), berombak/landai (3-8%), dan agak curam (30-45%). Peta kemiringan lereng di Kecamatan Banguntapan berdasarkan klasifikasi tersebut terdapat pada Gambar 9.



Gambar 9. Peta Kemiringan Lereng di Kecamatan Banguntapan

Parameter lereng dalam penilaian kerentanan airtanah terhadap pencemaran berpengaruh pada besarnya potensi masuknya air yang membawa bahan pencemar sehingga mempengaruhi tingkat infiltrasi yang berpotensi meresapkan bahan pencemar ke dalam sistem akuifer airtanah. Pemberian rating parameter lereng menggunakan klasifikasi lereng metode *SINTACS*, sehingga menghasilkan peta persebaran rating lereng yang ditunjukkan oleh Gambar 10.

Kondisi lereng di lokasi penelitian secara umum tergolong tinggi. Nilai rating yang tinggi menunjukkan bahwa semakin tinggi kerentanan airtanah terhadap pencemarannya karena potensi masuknya air limpasan semakin besar. Lokasi penelitian sebagian besar tersusun atas lereng datar (0-3%). Lereng tersebut berada pada bentuklahan dataran kaki Gunungapi Merapi Muda. Bentuklahan tersebut memiliki morfologi berupa dataran sehingga potensi tercemarnya airtanah relatif tinggi. Limpasan permukaan pada dataran umumnya relatif kecil daripada wilayah yang berlereng miring hingga curam. Tingkat infiltrasi pada dataran juga lebih tinggi. Kedua hal tersebut menyebabkan lereng yang datar memiliki rating yang tinggi yaitu 9 karena potensi masuknya bahan pencemar berdasarkan kelas lereng tergolong paling besar. Lereng berombak/landai (3-8%) terdapat pada bentuklahan dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda dan dataran alluvial Formasi Semilir. Lereng ini memiliki rating cukup tinggi yaitu 7,5. Potensi masuknya bahan pencemar terhadap airtanah pada bentuklahan ini masih tergolong cukup tinggi walaupun tidak setinggi wilayah pada lereng datar. Lereng agak curam (30-45%) miring diberi rating sebesar 2,5. Bentuklahan yang memiliki kemiringan lereng agak curam hanya terdapat pada bentuklahan perbukitan struktural Formasi Semilir. Bentuklahan tersebut memiliki potensi pencemaran paling rendah dilihat berdasarkan morfologinya yang berupa perbukitan. Potensi terjadinya limpasan permukaan pada morfologi perbukitan tergolong tinggi sehingga kemungkinan masuknya bahan pencemar ke dalam sistem akuifer airtanah akan cenderung rendah.



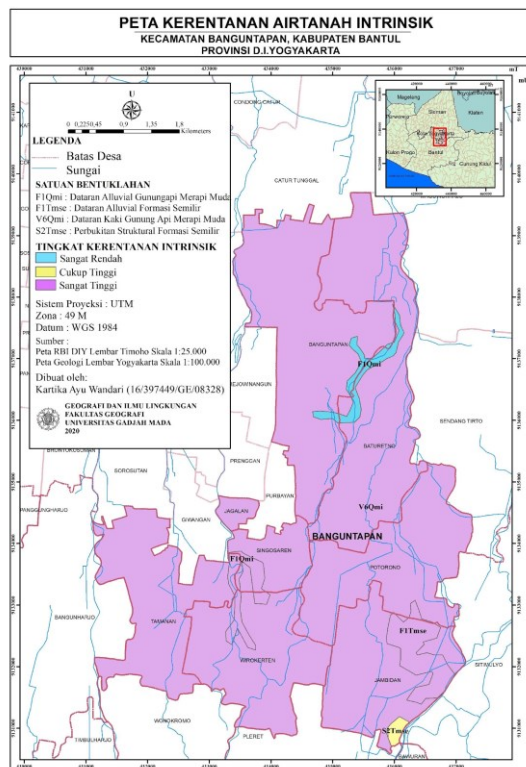
Gambar 10. Peta Rating Kemiringan Lereng (S)

#### h. Kerentanan Airtanah Intrinsik dengan Menggunakan Metode *SINTACS*

Peta kerentanan airtanah intrinsik terhadap pencemaran merupakan hasil tumpangt susun (*overlay*) tujuh parameter kerentanan airtanah metode *SINTACS*. Hasil penilaian dan pemetaan kerentanan airtanah intrinsik di Kecamatan Banguntapan menunjukkan bahwa terdapat tiga kelas kerentanan airtanah yaitu sangat rendah, cukup tinggi, dan sangat tinggi (Gambar 11). Adapun rentang nilai indeks kerentanan airtanah intrinsik di Kecamatan Banguntapan adalah sebesar 113,375– 146,375.

Sebagian besar lokasi penelitian memiliki tingkat kerentanan airtanah intrinsik terhadap pencemaran dengan kelas sangat tinggi yaitu mencakup bentuklahan dataran kaki Gunungapi Merapi Muda, dataran alluvial Formasi Semilir, dan sebagian dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda dengan nilai indeks kerentanan intrinsik airtanah berkisar 145,725 -146,375. Bentuklahan perbukitan struktural Formasi Semilir tergolong ke dalam kelas cukup tinggi dengan nilai indeks kerentanan intrinsik airtanah sebesar 133,375. Sebagian bentuklahan dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda yang berada di lokasi penelitian bagian utara tergolong ke dalam kelas sangat rendah dengan nilai indeks kerentanan intrinsik airtanah sebesar 113,375. Hasil klasifikasi tersebut menunjukkan secara umum Kecamatan Banguntapan memiliki kerentanan intrinsik airtanah terhadap pencemaran yang sangat tinggi.





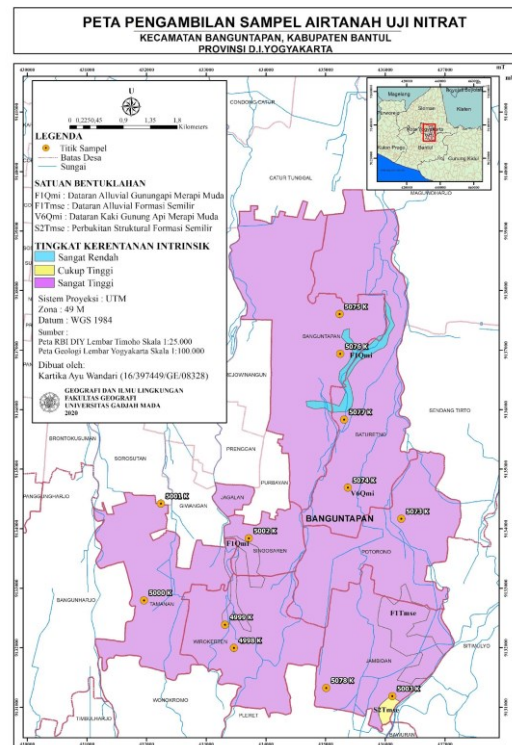
Gambar 11. Peta Kerentanan Airtanah Intrinsik dengan Metode *SINTACS*

Kerentanan intrinsik airtanah pada lokasi penelitian tergolong sangat tinggi disebabkan karena sebagian besar kedalaman muka airtanahnya dangkal, tingkat infiltrasinya cukup tinggi, material zona jenuh dan media akuifer didominasi oleh pasir, tekstur tanah sebagian besar berupa lempung berpasir, konduktivitas hidrolik yang cukup besar, dan memiliki kemiringan lereng yang datar (0-3%). Setiap parameter tersebut memiliki rating yang tinggi sehingga apabila dijumlahkan menghasilkan indeks kerentanan intrinsik yang besar.

Parameter yang cukup berpengaruh terhadap perbedaan kelas kerentanan intrinsik airtanah sangat tinggi, cukup tinggi dan sangat rendah yaitu tekstur tanah. Material lempung pada bentuklahan dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda yang berada di bagian utara lokasi penelitian menghasilkan rating yang lebih rendah dibanding material pasir. Permeabilitas tanah bertekstur lempung lebih rendah daripada tanah bertekstur pasir sehingga akan memengaruhi tingkat infiltrasi yang cenderung lebih rendah pula.

## 2. Analisis Kualitas Airtanah

Kualitas airtanah yang diuji dalam penelitian ini yaitu nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) yang digunakan untuk validasi dengan hasil penilaian dan pemetaan kerentanan airtanah terhadap pencemaran di lokasi penelitian. Sampel airtanah yang diambil sebanyak 12 titik pada beberapa titik di lokasi penelitian (Gambar 12). Penentuan titik pengambilan sampel airtanah didasarkan atas kelas kerentanan airtanah intrinsik di lokasi penelitian.



Gambar 12. Peta Pengambilan Sampel Airtanah Uji Nitrat

Klasifikasi konsentrasi nitrat yang tergolong tinggi sebagian besar berada pada wilayah dengan morfologi datar hingga landai yaitu pada bentuklahan dataran kaki Gunungapi Merapi Muda. Lokasi tersebut didominasi oleh penggunaan lahan permukiman dan sawah irigasi (Gambar 13). Hasil aktivitas dari adanya permukiman dan sawah memungkinkan menjadi sumber pencemar bagi airtanah. Nilai konsentrasi nitrat tertinggi yaitu sebesar 17,09 mg/L. Lokasi titik pengambilan sampel dengan nilai konsentrasi nitrat tertinggi berada di lokasi penelitian bagian utara. Berdasarkan hasil wawancara dengan beberapa warga di lokasi tersebut, meningkatnya pembangunan hotel dan mall menyebabkan keberadaan airtanah semakin sulit ditemukan sehingga banyak yang beralih dari sumur gali ke sumur bor ataupun suntik. Meningkatnya pembangunan juga akan memengaruhi kualitas airtanah di lokasi tersebut, hal ini ditunjukkan dengan nilai konsentrasi nitrat yang juga tinggi. Penggunaan pupuk urea dan NPK pada lahan sawah juga menjadi sumber pencemar bagi airtanah. Masuknya zat kimia tersebut akan memengaruhi kualitas airtanah di lokasi penelitian.

Klasifikasi konsentrasi nitrat yang tergolong sedang berada pada wilayah bermorfologi landai cenderung miring. Di lokasi penelitian hanya 1 titik sampel airtanah yang tergolong ke dalam klasifikasi sedang yang terdapat pada bentuklahan dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda. Nilai konsentrasi nitrat di lokasi tersebut sebesar 8,13 mg/L. Dominasi penggunaan lahan di lokasi tersebut berupa permukiman (Gambar 13).

Klasifikasi konsentrasi nitrat yang tergolong rendah banyak ditemukan di lokasi penelitian bagian selatan. Morfologi di lokasi tersebut sebagian besar berupa dataran dan terdapat pula perbukitan. Nilai konsentrasi nitrat terendah yaitu sebesar  $< 0,01$  mg/L. Bentuklahan yang tergolong kelas ini yaitu dataran kaki Gunung api Merapi

Muda dan Perbukitan Struktural Formasi Semilir. Dominasi penggunaan lahan yang berupa sawah irigasi dan masih sedikitnya jumlah permukiman yang ada menyebabkan potensi bahan pencemar yang masuk ke dalam airtanah pun rendah (Gambar 13). Adanya perbukitan yang memiliki kemiringan lereng cenderung curam akan menyebabkan limpasan permukaan lebih besar sehingga potensi masuknya bahan pencemar untuk terinfiltrasi lebih kecil.

a  
b  
c

Gambar 13. Penggunaan Lahan di Kecamatan Banguntapan dengan Nilai Konsentrasi Nitrat a) Tinggi, b) Sedang, dan c) Rendah

### 3. Kerentanan Airtanah Spesifik

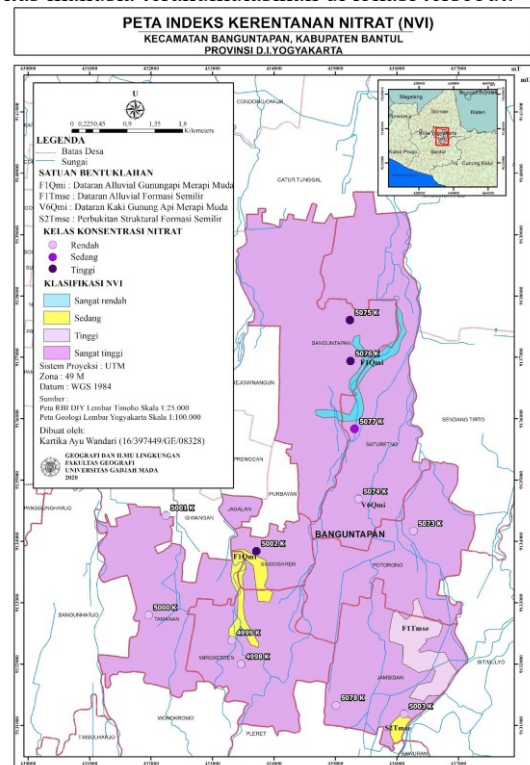
Penilaian dan pemetaan kerentanan airtanah spesifik menggunakan parameter kerentanan airtanah intrinsik yang ditambah dengan parameter penggunaan lahan. Parameter penggunaan lahan diasumsikan sebagai sumber potensial yang menghasilkan bahan pencemar. Pemberian bobot dan rating pada parameter penggunaan lahan diperlukan untuk menghasilkan indeks kerentanan airtanah spesifik. Penentuan bobot parameter penggunaan lahan menggunakan metode indeks kerentanan nitrat (*Nitrate Vulnerability Index/ NVI*) yang dikorelasikan dengan hasil uji laboratorium konsentrasi nitrat di lokasi penelitian.

Peta indeks kerentanan nitrat/ *nitrate vulnerability index (NVI)* pada Gambar 14 menunjukkan bahwa kerentanan nitrat di Kecamatan Banguntapan terdiri atas tingkat kerentanan sangat rendah, rendah dan sedang. Adapun distribusi titik sampel airtanah hasil uji konsentrasi nitrat di Kecamatan Banguntapan terdiri atas kelas rendah, sedang, dan tinggi. Sejumlah 2 sampel airtanah yang mengandung konsentrasi nitrat tinggi termasuk dalam indeks kerentanan sangat tinggi, 1 sampel airtanah yang mengandung konsentrasi nitrat sedang termasuk dalam indeks kerentanan sangat rendah, 1 sampel airtanah yang mengandung konsentrasi nitrat tinggi termasuk dalam indeks kerentanan sedang, 2 sampel airtanah yang mengandung konsentrasi nitrat rendah termasuk dalam indeks kerentanan sedang, dan sebanyak 6 sampel airtanah yang mengandung konsentrasi nitrat rendah termasuk dalam indeks kerentanan sedang, tinggi dan sangat tinggi.

Pola indeks kerentanan nitrat cenderung mengikuti penggunaan lahan yang ada. Sampel airtanah yang diuji di laboratorium diambil dari sumur gali yang dianggap representatif dengan tingkat kerentanan airtanah intrinsik dan penggunaan lahan yang berbeda. Pengambilan sampel airtanah sebanyak 12 sampel dengan proporsi 2 sampel airtanah pada tingkat kerentanan sangat rendah, 1 sampel airtanah pada tingkat kerentanan cukup tinggi, dan 9 sampel airtanah pada tingkat kerentanan sangat tinggi. Jumlah sampel airtanah yang diambil disesuaikan pula dengan luasan dan variasi penggunaan lahan yang terdapat di lokasi penelitian.

Peta indeks kerentanan nitrat/ *nitrate vulnerability index (NVI)* di Kecamatan Banguntapan dibagi berdasarkan satuan bentuklahan. Konsentrasi nitrat cenderung sangat tinggi pada

bentuklahan dataran kaki Gunungapi Merapi Muda. Variasi penggunaan lahan dari utara hingga selatan menunjukkan variasi nilai konsentrasi nitrat pula. Konsentrasi nitrat tergolong rendah pada bentuklahan dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda yang berada di bagian utara lokasi penelitian. Dominasi penggunaan lahan yang berupa lahan pertanian seperti sawah dan tegalan menyebabkan sumber bahan pencemar hanya berasal dari aktivitas pertanian. Konsentrasi nitrat tergolong sangat sedang pada dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda di bagian selatan lokasi penelitian dan perbukitan struktural Formasi Semilir. Pengaruh dari aktivitas manusia yang rendah di lokasi tersebut menyebabkan sumber pencemar yang masuk ke dalam airtanah didominasi oleh hasil aktivitas alam. Pengaruh morfologi bentuklahan yang cenderung landai dan agak curam menyebabkan infiltrasi sumber pencemar ke dalam airtanah pun rendah. Konsentrasi nitrat tergolong tinggi pada dataran alluvial Formasi Semilir. Morfologi yang rendah dan landai menyebabkan aliran air mengumpul sehingga infiltrasi dan masuknya bahan pencemar hasil aktivitas manusia terakumulasi di lokasi tersebut.



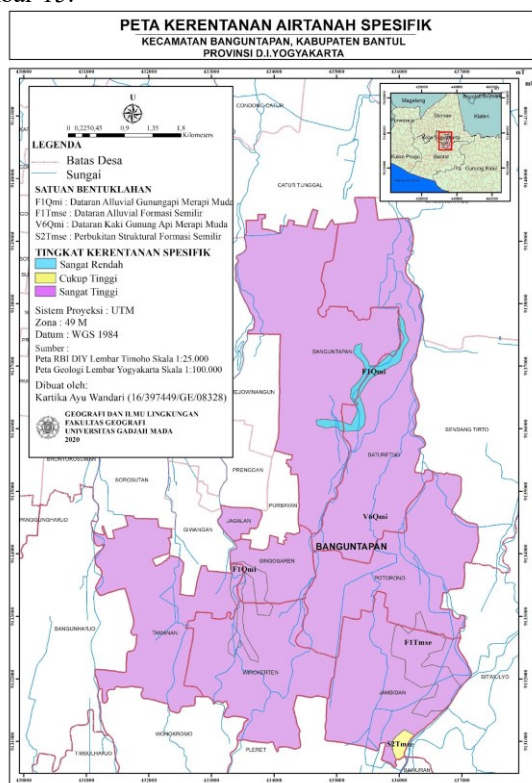
Gambar 14. Peta Indeks Kerentanan Nitrat/ *Nitrate Vulnerability Index (NVI)*

Nilai indeks kerentanan nitrat yang dikorelasikan dengan hasil uji konsentrasi nitrat di laboratorium menghasilkan nilai koefisien korelasi sebesar -0,39. Nilai negatif pada koefisien korelasi menunjukkan bahwa kedua variabel tersebut tidak memiliki hubungan yang kuat, karena nilai koefisien korelasi kurang dari 0 (Santoso, 2000). Nilai signifikansi menunjukkan bahwa kedua variabel tersebut juga tidak memiliki hubungan yang signifikan karena menunjukkan nilai signifikansi yang lebih besar dari 0,05. Berdasarkan hasil uji korelasi spearman's rho, maka bobot untuk parameter penggunaan lahan di lokasi penelitian



bernilai 1. Adapun pemberian rating untuk penggunaan lahan disesuaikan dengan tabel rating penggunaan lahan.

Peta kerentanan airtanah spesifik di Kecamatan Banguntapan diperoleh dari tumpang-susun (*overlay*) delapan parameter penilaian kerentanan airtanah yaitu tujuh parameter kerentanan airtanah intrinsik ditambah dengan parameter penggunaan lahan. Tingkat kerentanan airtanah spesifik juga diklasifikasikan menjadi enam kelas. Hasil penilaian dan pemetaan kerentanan airtanah menunjukkan bahwa tingkat kerentanan airtanah spesifik di Kecamatan Banguntapan terdiri atas tiga kelas yaitu sangat rendah, cukup tinggi, dan sangat tinggi. Adapun nilai kerentanan airtanah spesifik yang dihasilkan yaitu berkisar antara 119,875 – 151,4. Sebagian besar wilayah Kecamatan Banguntapan memiliki tingkat kerentanan airtanah terhadap pencemaran dengan kelas sangat tinggi yaitu mencakup 28,126 km<sup>2</sup> atau 98,3% dari total luas lokasi penelitian. Area seluas 0,094 km<sup>2</sup> atau 0,32% memiliki tingkat kerentanan dengan kelas sedang dan tingkat kerentanan dengan kelas sangat rendah seluas 0,39 km<sup>2</sup> atau 1,36%. Hasil klasifikasi kerentanan airtanah tersebut menunjukkan bahwa secara umum Kecamatan Banguntapan memiliki kerentanan airtanah spesifik terhadap pencemaran yang sangat tinggi. Distribusi tingkat kerentanan airtanah spesifik terhadap pencemaran di Kecamatan Banguntapan dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Peta Kerentanan Airtanah Spesifik

Kerentanan spesifik airtanah terhadap pencemaran di Kecamatan Banguntapan diklasifikasikan berdasarkan satuan bentuklahannya. Tingkat kerentanan spesifik airtanah pada bentuklahan dataran kaki Gunungapi Merapi Muda, dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda yang berada di bagian selatan lokasi penelitian, dan dataran alluvial Formasi Semilir tergolong kelas kerentanan sangat tinggi dengan nilai indeks kerentanan spesifik airtanah berkisar 150,045- 151,4.

Wilayah tersebut memiliki tingkat kerentanan sangat tinggi karena sebagian besar muka airtanahnya dangkal, infiltrasinya cukup tinggi, material zona jenuh dan media akuifer sebagian besar tersusun atas pasir dan lempung, konduktivitas hidraulik yang cukup besar, dan berlereng datar (0-3%). Sebagian besar penggunaan lahan yang berkembang di wilayah tersebut pun sudah banyak dipengaruhi oleh aktivitas manusia berupa permukiman dan sawah yang memiliki rating tinggi.

Tingkat kerentanan spesifik airtanah pada bentuklahan perbukitan struktural Formasi Semilir tergolong kelas cukup tinggi dengan nilai indeks kerentanan spesifik airtanah sebesar 139,045. Wilayah tersebut memiliki kedalaman muka airtanah yang cenderung sedang hingga dalam, infiltrasi tergolong lebih rendah karena berupa daerah perbukitan, tekstur tanah yang mendominasi berupa lempung berpasir, dan kemiringan lereng yang agak miring hingga curam. Penggunaan lahan yang dominan berupa tegalan dan sawah sehingga menghasilkan rating yang lebih rendah.

Tingkat kerentanan spesifik airtanah pada bentuklahan dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda yang berada di bagian utara lokasi penelitian tergolong kelas kerentanan sangat rendah. Karakteristik secara umum antara dataran alluvial Gunungapi Merapi Muda hampir sama dengan yang berada di bagian selatan lokasi penelitian namun terdapat perbedaan pada parameter tekstur tanah. Tekstur tanah yang berkembang di wilayah tersebut berupa lempung. Sifat lempung yang sulit menyerap dan meloloskan air sehingga diberi rating rendah. Penggunaan lahan didominasi oleh area sawah dan kebun sehingga pengaruh dari aktivitas domestik masih rendah.

Hasil pemetaan dan penilaian kerentanan spesifik airtanah sama dengan hasil pemetaan dan penilaian kerentanan intrinsik airtanah walaupun ada penambahan parameter penggunaan lahan. Pemberian bobot yang rendah untuk penggunaan lahan menjadikan parameter tersebut tidak banyak memengaruhi tingkat kerentanan airtanah di lokasi penelitian.

#### 4. Validasi Terhadap Peta Kerentanan Airtanah Terhadap Pencemaran dengan Parameter Nitrat

Konsentrasi nitrat hasil uji laboratorium di Balai Besar Teknik Kesehatan Lingkungan dan Pengendalian Penyakit (BBTKLHPP) Yogyakarta kemudian diklasifikasikan berdasarkan PP No. 82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air. Konsentrasi nitrat di Kecamatan Banguntapan terdiri atas kelas rendah (0-5 mg/liter), sedang (5-10 mg/liter), dan tinggi (>10 mg/liter). Konsentrasi nitrat kelas rendah terdiri dari 8 sampel, kelas sedang hanya 1 sampel, dan kelas tinggi terdiri dari 3 sampel.

Validasi terhadap peta kerentanan airtanah intrinsik dan spesifik terhadap pencemaran dilakukan untuk mengetahui keakuratan dan kesesuaian metode *SINTACS* dengan kondisi sesungguhnya di lapangan. Validasi tersebut dilakukan dengan membandingkan hasil tingkat kerentanan airtanah di lokasi penelitian dengan hasil uji konsentrasi nitrat di laboratorium.

Analisis pada masing-masing hasil uji matriks antara konsentrasi nitrat dengan tingkat kerentanan airtanah intrinsik dan kerentanan airtanah spesifik di Kecamatan Banguntapan menunjukkan bahwa nilai kesesuaiannya sebesar 25%. Sebanyak 3 sampel airtanah dari 12 sampel

airtanah yang diambil untuk uji nitrat telah sesuai dengan penilaian dan pemetaan kerentanan airtanah intrinsik metode *SINTACS* maupun kerentanan airtanah spesifik. Tingkat kerentanan airtanah yang sama pada kedua penilaian dan pemetaan kerentanan airtanah intrinsik maupun spesifik serta sama-sama dibatasi oleh bentuklahan menyebabkan nilai kesesuaian hasil uji matriks dengan konsentrasi nitrat yang terdapat di lokasi penelitian pun sama.

Analisis pada masing-masing hasil uji korelasi antara konsentrasi nitrat dengan tingkat kerentanan airtanah intrinsik dan kerentanan airtanah spesifik di Kecamatan Banguntapan menunjukkan bahwa nilai koefisien korelasinya sangat rendah yaitu sebesar 0,195 untuk kerentanan intrinsik dan -0,039 untuk kerentanan spesifik. Adapun tingkat signifikansi kedua variabel tersebut terhadap konsentrasi nitrat bernilai lebih dari 0,05. Berdasarkan nilai sig. (2-tailed) maka dapat disimpulkan bahwa variabel konsentrasi nitrat tidak memiliki hubungan yang signifikan/searah dengan variabel kerentanan airtanah intrinsik maupun spesifik.

Rendahnya hasil validasi tersebut belum dapat diartikan bahwa metode *SINTACS* kurang sesuai untuk diterapkan di Kecamatan Banguntapan. Metode *SINTACS* yang telah dimodifikasi sesuai pengalaman peneliti dan karakteristik lokasi penelitian merupakan metode kuantitatif (Stigter, et al., 2005). Modifikasi yang dilakukan berupa perubahan bobot dan penambahan parameter penggunaan lahan. Berdasarkan hal tersebut terdapat parameter yang kurang sesuai di lokasi penelitian (Elsheikh, et al., 2013). Parameter yang menunjukkan nilai yang kurang sesuai adalah infiltrasi yang memiliki nilai seragam 0-25 mm/tahun. Perbedaan iklim antara wilayah Mediterania, Italia (asal metode *SINTACS*) dengan Kecamatan Banguntapan, Indonesia berpengaruh terhadap perbedaan curah hujan dan infiltrasi sehingga hasil penilaian kerentanan airtanah di Kecamatan Banguntapan menjadi di bawah batas akurasi. Hal tersebut diperkuat oleh hasil penelitian Noori, et al., (2018) yang menunjukkan bahwa metode *SINTACS* di iklim yang sama dengan Mediterania memiliki tingkat akurasi terbaik dibandingkan dengan metode *DRASTIC* dan *SI*. Di samping itu, parameter kualitas airtanah yaitu konsentrasi nitrat yang juga kurang sesuai. Klasifikasi nitrat dianggap kurang sesuai dengan klasifikasi yang diatur oleh pemerintah Indonesia dalam PP No.82 Tahun 2001 yang terlampaui tinggi (Stigter, et al., 2005). Faktor lain yang memengaruhi rendahnya validasi adalah adanya keterbatasan akses saat pandemi akibatnya pengambilan sampel airtanah banyak dilakukan hanya pada area dengan penggunaan lahan terbuka (sawah, lapangan, kebun atau tegalan) dan sebaran sumur gali yang tidak merata pada lokasi penelitian.

Hasil validasi kerentanan airtanah terhadap pencemaran, baik kerentanan airtanah intrinsik maupun spesifik yang cenderung rendah juga dapat disebabkan oleh nilai konsentrasi nitrat kelas tinggi, sedang, dan rendah yang nilainya tersebar dan tidak merata. Faktor yang dapat mempengaruhi konsentrasi nitrat di lokasi penelitian pada zona tak jenuh maupun zona jenuh air antara lain adalah dinamika airtanah, kondisi fisik wilayah, dan reaksi kimia yang terjadi di tanah. Dinamika airtanah dapat diamati berdasarkan debit airtanah pada wilayah bermorfologi datar dengan akuifer yang memiliki produktivitas sedang yang

tersebar secara luas dan memiliki debit sumur 5 liter/detik (Sudadi, 1985). Debit tersebut seharusnya dapat mendistribusikan bahan pencemar secara cepat, namun hasil pengujian nitrat menunjukkan tidak semua berkonsentrasi tinggi pada wilayah datar. Sebanyak 3 sampel airtanah pada wilayah yang memiliki morfologi datar memiliki konsentrasi nitrat tinggi, 8 sampel airtanah memiliki konsentrasi nitrat rendah, dan hanya 1 sampel airtanah yang memiliki konsentrasi nitrat sedang. Reaksi kimia yang terjadi pada tanah juga dapat mempengaruhi konsentrasi nitrat karena adanya oksidasi, reduksi, hidrolisis, dan pertukaran ion yang dapat menurunkan konsentrasi nitrat yang mengkontaminasi airtanah (Aller et al., 1987).

## 5. Faktor Dominan Yang Mempengaruhi Tingkat Kerentanan Airtanah Bebas terhadap Pencemaran

Analisis sensitivitas dilakukan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi pengaruh setiap parameter terhadap hasil pemetaan dan penilaian kerentanan airtanah di Kecamatan Banguntapan. Hasil dari analisis sensitivitas dapat menunjukkan parameter-parameter yang memiliki pengaruh paling signifikan maupun kurang signifikan terhadap hasil pemetaan dan penilaian kerentanan airtanah yang telah dibuat. Analisis sensitivitas yang digunakan yaitu analisis sensitivitas parameter tunggal. Analisis ini membandingkan bobot teoretis dari setiap parameter kerentanan airtanah dengan bobot efektif yang diperoleh dari perhitungan statistik.

Hasil penilaian dan pemetaan kerentanan airtanah intrinsik dan spesifik di Kecamatan Banguntapan menunjukkan bahwa terdapat tiga kelas kerentanan yaitu sangat tinggi, cukup tinggi, dan sangat rendah. Parameter penilaian kerentanan airtanah yang paling memengaruhi penilaian kerentanan airtanah terhadap pencemaran di Kecamatan Banguntapan berdasarkan bobot teoritisnya ada tiga yaitu kedalaman muka airtanah, infiltrasi, dan tekstur tanah. Penentuan parameter yang menjadi faktor dominan dalam penilaian kerentanan airtanah terhadap pencemaran kemudian ditentukan berdasarkan analisis sensitivitas. Berikut hasil analisis sensitivitas parameter tunggal secara statistik yang disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Analisis Sensitivitas Parameter Tunggal

No	Parameter	Bobot Teoretis	Bobot Teoretis (%)	Bobot Efektif (%)
1	S	5	18,52	21,84
2	I	5	18,52	2,81
3	N	4	14,81	8,96
4	T	5	18,52	17,70
5	A	3	11,11	9,69
6	C	2	7,41	3,65
7	S	2	7,41	4,78
8	<i>Landuse</i>	1	3,70	0

(Sumber: Hasil Pengolahan Data, 2020)

Hasil analisis sensitivitas menunjukkan parameter kedalaman muka airtanah, memiliki bobot efektif yang lebih besar dibandingkan dengan bobot teoritisnya. Hasil tersebut menunjukkan bahwa faktor dominan yang memengaruhi tingkat kerentanan airtanah di Kecamatan Banguntapan disebabkan oleh kedalaman muka airtanah yang dangkal.

Akibatnya pemberian rating kedalaman muka airtanah menjadi tinggi. Adapun parameter lainnya memiliki bobot efektif yang lebih rendah dibandingkan dengan bobot teoretisnya bahkan untuk parameter penggunaan lahan memiliki nilai bobot sebesar 0%. Rendahnya bobot efektif pada parameter penggunaan lahan disebabkan oleh rendahnya nilai rating dan bobot sehingga pengaruh parameter terhadap tingkat kerentanan airtanah tidak signifikan. Parameter tekstur tanah dan media akuifer memiliki nilai bobot efektif yang cukup mendekati bobot teoritis sehingga pengaruh kedua parameter tersebut terhadap tingkat kerentanan airtanah masih cukup signifikan. Parameter infiltrasi, zona tak jenuh, konduktivitas hidraulik, dan kemiringan lereng mengalami penurunan bobot yang cukup signifikan. Hal tersebut menunjukkan bahwa parameter tersebut memiliki pengaruh yang kurang signifikan terhadap tingkat kerentanan airtanah hasil pemetaan dan penilaian kerentanan airtanah di Kecamatan Banguntapan.

## 11. KESIMPULAN

Kesimpulan dari hasil penelitian terkait studi kerentanan airtanah terhadap pencemaran di Kecamatan Banguntapan, Kabupaten Bantul adalah sebagai berikut.

1. Hasil penilaian dan pemetaan kerentanan airtanah intrinsik di Kecamatan Banguntapan terdiri atas tiga kelas kerentanan airtanah yaitu sangat rendah, cukup tinggi, dan sangat tinggi dengan nilai indeks kerentanan airtanah intrinsik berkisar antara 113,875 – 146,375.
2. Hasil penilaian dan pemetaan kerentanan airtanah spesifik di Kecamatan Banguntapan terdiri atas tiga kelas yaitu sangat rendah, cukup tinggi, dan sangat tinggi dengan nilai indeks kerentanan airtanah spesifik berkisar antara 119,875 – 151,4.
3. Hasil analisis matriks dan korelasi antara konsentrasi nitrat dengan tingkat kerentanan airtanah intrinsik dan kerentanan airtanah spesifik di Kecamatan Banguntapan menunjukkan nilai yang rendah. Rendahnya hasil validasi tersebut dikarenakan terdapat parameter yang kurang sesuai dengan kondisi lokasi penelitian yaitu infiltrasi dan konsentrasi nitrat serta adanya keterbatasan akses saat pandemi sehingga variasi penggunaan lahan saat pengambilan sampel airtanah terbatas.
4. Parameter yang menjadi faktor dominan yang memengaruhi tingkat kerentanan airtanah di Kecamatan Banguntapan berdasarkan hasil analisis sensitivitas parameter tunggal adalah kedalaman muka airtanah.

## 12. UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih sebanyak-banyaknya kepada Dr. M. Widyastuti, M.T dan Dr. Taufik Hery Purwanto, M.Si. sebagai dosen penguji dalam ujian skripsi penelitian saya ini serta untuk seluruh civita akademik dan rekan-rekan Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada yang telah banyak membantu saya dalam penyusunan penelitian ini.

## 13. DAFTAR PUSTAKA

Al-Amoush, H., Hammouri, N. A., Zunic, F., & Salameh, E. 2010. Intrinsic Vulnerability Assessment for the Alluvial Aquifer in the Northern Part of Jordan Valley. *Water Resources Management*, 24(13), 3461–3485.

- Al Hanbali, A dan A. Kondoh, 2008. Groundwater Vulnerability Assessment and Evaluation of Human Activity Impact (HAI) Within the Dead Sea Groundwater Basin, *Jordan. Hydrogeology Journal* 16:499-510.
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, i. H., Petty, R. J. & Hackett, G. 1987. *DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings*. EPA 600/2-87-035
- Bastida, J.J.M., M. Arauzo, dan M. Valladolid. 2009. Intrinsic and Specific Vulnerability of Groundwater in Central Spain: The Risk of Nitrate Pollution. *Hydrogeology Journal* 18:681-698.
- Civita, M. 2010. The Combined Approach When Assessing and Mapping Groundwater Vulnerability to Contamination, *J. Water Resource and Protection*, 2: 14-28.
- Civita, M dan M. De Maio. 2004. Assessing and Mapping Groundwater Vulnerability to Contamination: The Italian “Combined” Approach. *Geofisica Internacional* 43: 513-532.
- Elsheikh, R., Rashid, A., Shariff, M., Amiri, F., Ahmad, N.B., Balasundram, S.k., dan Soom, M.A.M. 2013. Agriculture Land Suitability Evaluator (ALSE): A Decision and Planning Support Tool for Tropical and Subtropical Crops. *Journal Elsevier Computers and Electronics in Agriculture*, 93: 98-110.
- Hendrayana, H. 2011. *Pengantaran Kerentanan Airtanah Terhadap Pencemaran dan Pemompaan Airtanah*. Yogyakarta: Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada.
- Knodel, K., Lange, K., Jorgen, V.H. 2007. *Environmental Geology: Handbook of Field Methods and Case Studies*.
- Majandang, J., & Sarapirome, S. 2013. Groundwater Vulnerability Assessment and Sensitivity Analysis in Nong Rua, Khon Kaen, Thailand, Using A GIS-Based SINTACS Model. *Environmental Earth Sciences*, 68(7), 2025–2039.
- Noori, Roohollah Ghahremanzadeh, Hooman Kløve, Bjørn Adamowski, Jan Franklin Baghvand, Akbar. 2018. Modified-DRASTIC, modified-SINTACS and SI methods for groundwater vulnerability assessment in the southern Tehran aquifer. *Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 54: 89-100.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia. 2001. PP No.82 Tahun 2001 tentang Pengelolaan Kualitas Air Dan Pengendalian Pencemaran Air. Jakarta: Pemerintah RI.
- Purnama, S., K. Andri, dan Sudaryatno. 2006. Model Konservasi Air Tanah di Dataran Pantai Kota Semarang. *Forum Geografi* 20(2): 160-174. Fakultas Geografi UGM
- Santosa, L. W. 2012. Hidrostatigrafi Akuifer Sebagai Geoindikator Genesis Bentuklahan di Wilayah Kepesisiran Kabupaten Kulonprogo, Daerah Istimewa Yogyakarta. *Jurnal Forum Geografi*. Vol 26 No. 2: 160 – 177.
- Santosa, L.W. dan Adji, T.N. 2014. *Karakteristik Akuifer dan Potensi Airtanah Graben Bantul*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Sinan, M. dan M. Razack. 2008. An Extension to The DRASTIC Model to Assess Groundwater Vulnerability to Pollution: Application to The Houz Aquifer of Morocco. *Journal of Environment Geology* 57: 349-363.
- Sudadi, P. 1985. *Peta Hidrogeologi Indonesia*. Bandung: Direktorat Geologi Tata Lingkungan.
- Sudarmanto, A., Buchori, I., dan Sudarno. 2014. Perbandingan Infiltrasi Lahan terhadap Karakteristik Fisik Tanah, Kondisi Penutupan Tanah dan Kondisi Tegakan Pohon pada Berbagai Jenis Pemanfaatan Lahan. *Jurnal Penelitian Media Informasi Pengembangan Ilmu dan Profesi Kegeografisan Jurusan Geografi UNDIP* (11): 1-13.
- Shiklomanov, I. 1993. *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. New York: Oxford University Press.
- Sri Harto. 1993. *Analisis Hidrologi*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Stigter, T.Y., Ribeiro, L., and Dill, A.M.M.C. 2005. Evaluation of an Intrinsic and a Specific Vulnerability Assessment Method in Comparison with Groundwater Salinisation And Nitrate

- Contamination Levels in Two Agricultural Regions in the South of Portugal. *Hydrogeology Journal*, 14: 79-99.
- Van Zuidam, R.A. 1985. *Aerial Photo-Interpretation Terrain Analysis and Geomorphology Mapping*. Smits Publishers, The Hague:442 pp.
- Verstappen, H.Th. 1983. *Applied Geomorphology: Geomorphological Surveys for Environmental Developments*, Elsevier, Amsterdam.
- Vrba J, Zaporozec A. 1994. *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability, International Association of Hydrogeologists (International Contribution to Hydrogeology 16)*. Heinz Heise, Hannover.
- Worrall F dan Kolpin DW. 2004. Aquifer Vulnerability to Pesticide Pollution- Combining Soil, Land-use and Aquifer Properties with Molecular Descriptors. *J. Hydrol.* 293 (1-4):191-204.